

## 種々の融点を有する粒界材により2相析出させた FePt グラニューラ薄膜の構造と磁気特性 (1)

○齊藤 節<sup>1</sup>, タム キム コング<sup>2</sup>, 櫛引 了輔<sup>2</sup>, 小川 智之<sup>1</sup>, 齊藤 伸<sup>1</sup>

(1. 東北大学, 2. 田中貴金属)

Structure and magnetic properties of FePt granular film precipitated in two phases by grain boundary materials with various melting points (1)

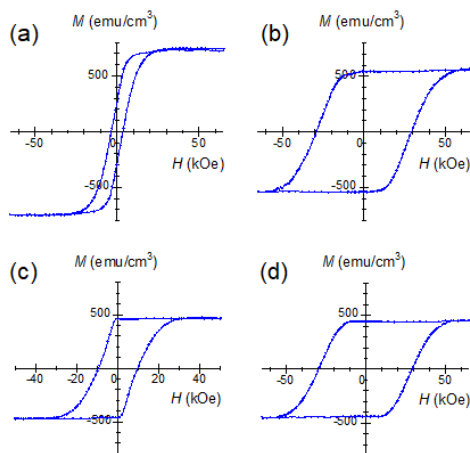
○Takashi Saito<sup>1</sup>, Kim Kong Tham<sup>2</sup>, Ryosuke Kushibiki<sup>2</sup>, Tomoyuki Ogawa<sup>1</sup>, and Shin Saito<sup>1</sup>

(1. Tohoku Univ., 2. TANAKA KIKINZOKU KOGYO K. K.)

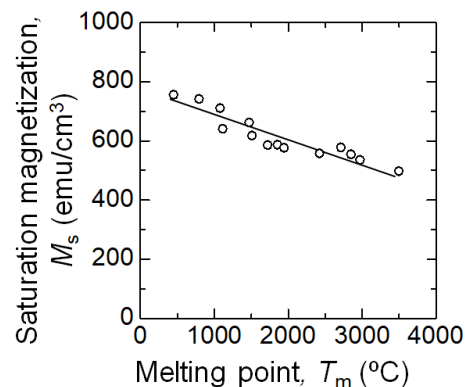
**はじめに** 垂直磁気記録媒体のグラニューラ記録層では、室温で高い結晶磁気異方性エネルギーを有する磁性結晶粒の  $c$  軸配向化、柱状組織化、ならびに磁氣的孤立化が求められている。これらの要求を満たすため従来の媒体では、磁性層中の粒界材 (Grain boundary material: GBM) は重要な役割を担ってきた。現状実用されている CoPt-酸化物グラニューラ薄膜においては、CoPt 磁性結晶粒の粒界に非磁性酸化物が析出する。このグラニューラ層では、磁性結晶粒内に導入される積層欠陥、さらには磁性結晶粒の飽和磁化や結晶磁気異方性エネルギーが粒界材融点に強く依存することが明らかとなっている<sup>1)</sup>。一方、次世代の熱アシスト磁気記録用の媒体では、 $L1_0$ 型 FePt グラニューラ薄膜が有力な候補材料である。この FePt グラニューラ薄膜に関する先行研究では、粒界材の電気陰性度<sup>2)</sup>、表面エネルギー<sup>3)</sup>、凝集エネルギー<sup>4)</sup>と、グラニューラ組織ならびに磁気特性との相関が報じられているが、粒界材の融点に着目して特性を整理している報告は見当たらない。そこで、今回我々は融点異なる様々な GBM を有する FePt-GBM グラニューラ薄膜の構造および磁気特性を評価し、粒界材融点との相関を議論したので報告する。

**実験結果** 試料の層構成は FePt-30vol.%GBM (5 nm)/MgO(5 nm)/a-Co<sub>60</sub>W<sub>40</sub>(80 nm)/Sub.とした。GBM は B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ( $T_m$ : 450 °C)、MoO<sub>3</sub> (795 °C)、SnO (1080 °C)、GeO<sub>2</sub> (1115 °C)、WO<sub>3</sub> (1473 °C)、Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (1512 °C)、SiO<sub>2</sub> (1723 °C)、TiO<sub>2</sub> (1857 °C)、MnO (1945 °C)、Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (2425 °C)、ZrO<sub>2</sub> (2715 °C)、BN (2973 °C)、C (3500 °C)である。磁性層は FePt 相の規則化のため、基板温度を 550 °C として成膜した。XRD 測定により試料中には  $c$  軸配向した FePt 結晶粒が存在していることがわかった。Fig. 1 に (a) FePt-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、(b) SnO、(c) TiO<sub>2</sub>、(d) C (カーボン) グラニューラ薄膜の磁化曲線を示す。なお、FePt グラニューラ薄膜の磁化は FePt 結晶粒と粒界材との体積平均値である。非磁性の粒界材と FePt の体積割合は一定にもかかわらず、飽和磁化 ( $M_s$ ) や保磁力 ( $H_c$ ) は試料間で大きく異なる。Fig. 2 には  $M_s$  の粒界材融点依存性を示した。粒界材融点が 450 から 3500 °C に増加すると、 $M_s$  は 795 から 497 emu/cm<sup>3</sup> へと単調に減少した。FePt グラニューラ薄膜においても  $M_s$  は粒界材の融点に強く依存することがわかった。これは粒界材の融点が低いほど、FePt 結晶粒と粒界材との2相析出が良好となるためと考えられる。講演では、保磁力、FePt 結晶粒の粒径および規則度と、粒界材融点との相関についても議論する。

**参考文献** 1) R. Kushibiki et al., *IEEE Trans. Magn.*, **53**, 3200604 (2017). 2) T. Ono et al., *The 13th Joint MMM-Intermag Conference*, CV-08, San Diego (2016). 3) S. D. Granz et al., *Eur. Phys. J. B*, **86**, 81 (2013). 4) T. Shiroiyama et al., *IEEE Trans. Magn.*, **49**, 3616 (2013).



**Fig. 1** Typical  $M$ - $H$  loops for  $L1_0$  type FePt granular films with GBMs of (a) B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, (b) SnO, (c) TiO<sub>2</sub>, and (d) C.



**Fig. 2**  $M_s$  for FePt granular films as a function of the  $T_m$  of the GBMs.

## 種々の融点を有する粒界材により 2 相析出させた FePt グラニューラ薄膜の構造と磁気特性 (2)

○齊藤 節<sup>1</sup>, タム キム コング<sup>2</sup>, 櫛引 了輔<sup>2</sup>, 小川 智之<sup>1</sup>, 齊藤 伸<sup>1</sup>

(1. 東北大学, 2. 田中貴金属)

Structure and magnetic properties of FePt granular film precipitated in two phases by grain boundary materials with various melting points (2)

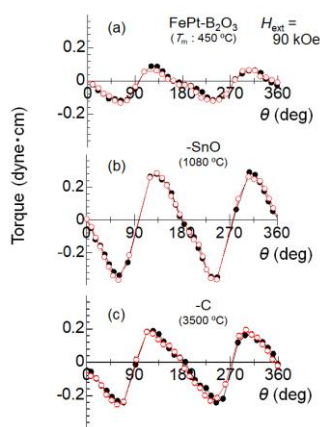
○Takashi Saito<sup>1</sup>, Kim Kong Tham<sup>2</sup>, Ryosuke Kushibiki<sup>2</sup>, Tomoyuki Ogawa<sup>1</sup>, and Shin Saito<sup>1</sup>

(1. Tohoku Univ., 2. TANAKA KIKINZOKU KOGYO K. K.)

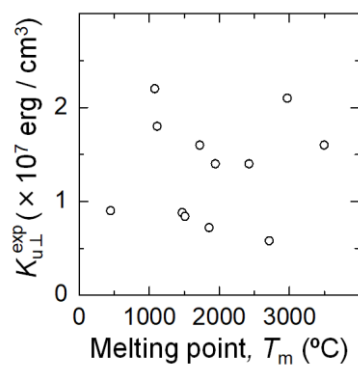
**はじめに** 次世代の熱アシスト磁気記録用の媒体では、室温で高い一軸結晶磁気異方性を有する L1<sub>0</sub> 型 FePt 結晶粒を非磁性粒界材 (Grain boundary material: GBM) で孤立化させたグラニューラ薄膜が有力な候補材料である<sup>1)</sup>。この FePt グラニューラ薄膜の GBM の材料開発に関する先行研究では、GBM として C, GeO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, C-Ag のうち何種かを用いた試料の特性評価の報告はあるが<sup>2,3)</sup>、材料種が少なく GBM がもたらすグラニューラ薄膜の構造と磁気特性について系統的にはまとめられていない。そこで、今回我々は FePt 相と粒界相との 2 相析出の指標である粒界材の融点<sup>4,5)</sup>に着目し、450 °C の B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> から 3500 °C の C (カーボン) まで 12 種の融点の異なる GBM を用いて FePt-GBM グラニューラ薄膜を作製し、垂直磁気異方性 ( $K_{u\perp}^{\text{exp}}$ ) と粒界材融点との相関を議論したので報告する。

**実験結果** 試料の層構成は FePt-30vol.%GBM (5 nm)/ MgO(5 nm)/ a-Co<sub>60</sub>W<sub>40</sub>(80 nm)/ Sub.とした。GBM は B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SnO, GeO<sub>2</sub>, WO<sub>3</sub>, Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, MnO, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>, BN, C である。磁性層は FePt 相の規則化のため、基板温度を 550 °C として成膜した。XRD 測定により GBM によっては面直、面内に *c* 軸配向した結晶粒が混在していることがわかった。Fig. 1 に一例として、(a) FePt-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, (b) -SnO, (c) -C グラニューラ薄膜の垂直磁気トルク曲線を示す。なお、 $\theta$  は基板法線方向からの磁化のなす角度である。Fe-Pt の組成や、FePt 相と非磁性粒界材との体積割合が一定であるにもかかわらず、トルク曲線の振幅は GBM に依存して変化することがわかった。また、FePt-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SnO グラニューラ薄膜では、トルク曲線中の  $\theta = 0, 180, 360$  (deg) でうねりが観測された。これは *c* 軸面内配向結晶粒に起因する 90 (deg) 位相がずれたトルク曲線が重畳したためと考えられる。Fig. 2 には  $K_{u\perp}^{\text{exp}}$  を粒界材融点に対してプロットした。 $K_{u\perp}^{\text{exp}}$  は  $5.8 \times 10^6$  から  $2.2 \times 10^7$  erg/cm<sup>3</sup> まで様々な値をとるが、その分布には傾向が認められず、 $K_{u\perp}^{\text{exp}}$  は粒界材融点に依存しないことがわかった。Fig. 3 には  $K_{u\perp}^{\text{exp}}$  と FePt 結晶粒の規則度 ( $S_{\text{in}}$ ) との相関を示した。ここで、 $S_{\text{in}}$  は in-plane XRD の FePt 相(110)、(220)面からの回折線の積分強度を用いて算出した<sup>5)</sup>。 $K_{u\perp}^{\text{exp}}$  は GBM に依存せず、 $S_{\text{in}}$  と正の相関があることがわかった。このことから、 $K_{u\perp}^{\text{exp}}$  は FePt 相と粒界相との 2 相析出ではなく、FePt 結晶粒の規則化と強い相関があることがわかった。

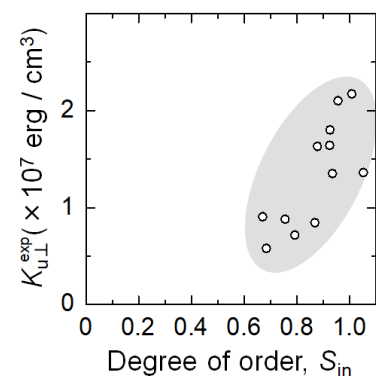
**参考文献** 1) D. Weller et al., *Phys. Status Solidi A*, **210**, 1245 (2013). 2) T. Ono et al., *Appl. Phys. Lett.*, **110**, 022402 (2017). 3) L. Zhang et al., *J. Magn. Magn. Mater.*, **322**, 2658 (2010). 4) R. Kushibiki et al., *IEEE Trans. Magn.*, **53**, 3200404 (2017). 5) T. Saito et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, **59**, 045501 (2020).



**Fig. 1** Typical torque curves for FePt granular films with (a) B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, (b) SnO, and (c) C GBMs.



**Fig. 2**  $K_{u\perp}^{\text{exp}}$  for FePt granular films as a function of  $T_m$  for the various GBMs.



**Fig. 3**  $K_{u\perp}^{\text{exp}}$  as a function of  $S_{\text{in}}$  for L1<sub>0</sub> typed FePt granular films.

# L1<sub>0</sub>-FePt 作製プロセスにおける実効的組成比変動現象の起源および抑制検討

小松田恭祐<sup>1</sup>, 塚本新<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>日本大学大学院理工学研究科, <sup>2</sup>日本大学理工学部)

Investigation of origin and suppression to variation of composition ratio in L1<sub>0</sub>-FePt fabrication process

K. Komatsuda<sup>1</sup>, A. Tsukamoto<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Graduate School of Nihon Univ, <sup>2</sup>College of Science and Technology, Nihon Univ.)

**はじめに** 超高密度磁気記録媒体の作製を目的として, Fe/Pt 二層膜に対して急速昇温熱処理(RTA: Rapid Thermal Annealing)および急速降温熱処理(RCP: Rapid Cooling Process)を施すことで, L1<sub>0</sub>規則合金化したFePt 孤立微粒子群が生成可能であることを報告している<sup>1)</sup>. そのプロセス途中でL1<sub>0</sub>-FePt以外の, Feを含む相が出現することが確認されているが, これらの詳細な生成段階は不明確であった. 本研究では, 主に磁気特性の観点からL1<sub>0</sub>-FePt以外の異種Fe系相の存在を明らかにする.

## 実験方法

①[ナノ微粒子形成の基板依存性] (i) 熱酸化Si基板および(ii) 熱酸化Si基板上にSiN(20nm)を積層した基板の各々に対して, 初期積層厚1.88 nm一定, 種々の組成比Fe<sub>x</sub>Pt<sub>100-x</sub> (x = 50~63.7 at.%)でFe/Pt二層膜を成膜した. これらの試料に対して到達真空度<1.0×10<sup>-3</sup> Paの雰囲気下で赤外線ランプ照射による昇温速度約180 °C/sec., 目標最高到達温度700 °Cの急速昇温を行い, その後, 窒素導入により降温速度約-120 °C/sec.で急速降温処理を行った.

②[3条件でのFe薄膜形成] (a) 熱酸化Si基板上にsub./Fe(*t*<sub>Fe</sub> nm)/SiN(3 nm) (*t*<sub>Fe</sub> = 1.88, 3.26, 5.26)の膜構成で成膜した. (b) 熱酸化Si基板上にsub./SiN(20 nm)/Fe(1.88 nm)/SiN(3 nm)の膜構成で成膜した. (c) 熱酸化Si基板上に真空下にてプラズマアッシングを施し, 真空下で連続して(a)と同条件で成膜した.

Fe, Ptの成膜はDCマグネトロンスパッタ法, SiNの成膜はRFマグネトロンスパッタ法にて行った. 作製した試料の磁気特性評価には超伝導量子干渉素子式振動試料型磁力計(SQUID-VSM)を用い, 磁化曲線測定を行った.

**実験結果** Fig.1に, 基板(i)(ii)上で作製したFePtナノ微粒子試料(粒子形~16 nm)の磁気特性から算出した, 飽和磁化*M*<sub>s</sub>, 保持力*H*<sub>c</sub>のFe組成比依存性を示す. 最表面がSiO<sub>x</sub>である基板(i)に対しSiNである基板(ii)を用いた場合, 組成比x=50 at.%における*M*<sub>s</sub>, *H*<sub>c</sub>が共に増大, *M*<sub>s</sub>, *H*<sub>c</sub>が最大となるFe組成比が50:50側にシフトする, 等の効果が確認できる. この結果は, 高い保磁力を示す成膜組成比がストイキオメトリよりFe過多側となる原因が, 成膜段階でのSiO<sub>x</sub>/Fe界面におけるFe化合物生成にあるとの仮定を支持するものである.

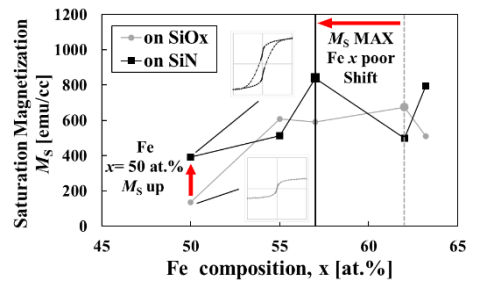
また, 詳細検討を行ったFig.2の結果より, (a) SiO<sub>x</sub>上のFe薄膜では一定量のFe磁気モーメント量の消失が見られるが, (b) SiN上のFe薄膜では, その現象が大幅に改善した. さらに(c)の結果から, 消失の要因が界面原子種のみならず, 大気暴露による効果が主要な要因であることが明らかとなった.

以上より基板最表面の窒化Si化による有効性, プラズマアッシングによる低減効果の可能性が示された.

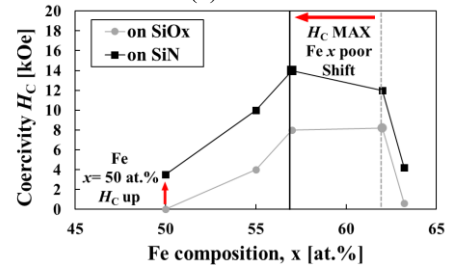
**謝辞** 本研究の一部は, 情報ストレージ研究推進機構の助成により行った.

## 参考文献

- 1) Y. Itoh, T. Aoyagi, A. Tsukamoto, K. Nakagawa, A. Itoh and T. Katayama: Jpn. J. Appl. Phys., 43, 12, 8040(2004)
- 2) Y. Utsushikawa, K. Niizuma: Journal of Alloys and Compounds 222 (1995) 188-192



(1) *M*<sub>s</sub>



(2) *H*<sub>c</sub>

Fig.1 (1) Saturation magnetization *M*<sub>s</sub> and (2) Coercivity *H*<sub>c</sub> of FePt sample (i) (ii)

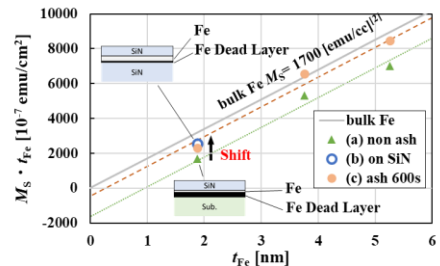


Fig.2 Magnetic moment of interface modified Fe thin film samples (a) - (c)

# FePt グラニューラー薄膜の微細組織に及ぼす格子不整合の影響

鈴木一平、高橋有紀子、宝野和博 (物質・材料研究機構)

Lattice mismatch effect on the microstructure of FePt based granular films

I. Suzuki, YK. Takahashi, and K. Hono (NIMS)

## はじめに

熱アシスト磁気記録(HAMR)は、記録密度 4 Tbit/in<sup>2</sup> を超える超高密度磁気記録が可能であるとされ、その開発が急がれている。そのような超高密度記録を実現する HAMR 媒体には、柱状構造を有する FePt 粒子の平均粒子サイズ(D)が 4.3 nm、粒子密度(GD)が  $3.8 \times 10^{12}/\text{cm}^2$  以上にまで微細化された FePt グラニューラー膜の開発が必要不可欠である<sup>(1)</sup>。そのために、非磁性マトリックスの材料探索や成膜プロセスの最適化<sup>(2)</sup>を中心とした手法によって、媒体開発が進められてきた。一方で、薄膜の微細組織制御には下地層も重要な役割を果たす。エピタキシャル薄膜においては、とりわけ成長初期では格子ミスマッチと薄膜の粒子サイズに相関があることが知られている<sup>(3)</sup>。そこで本研究では、FePt-C グラニューラー膜の粒子密度改善を目的とし、格子ミスマッチ変調に伴う FePt グラニューラー薄膜の微細組織変化を詳細に調べた。

## 実験方法

マグネトロンスパッタ法を用いて、異なる格子ミスマッチを有する基板上に FePt 及び FePt-C グラニューラー薄膜を作製した。基板は SrTiO<sub>3</sub>(STO), MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>(MAO), MgO, TiO<sub>2</sub> 基板を用いることで、格子ミスマッチを約 1%~16%の間で変調した。微細組織は TEM を、磁気特性は SQUID-VSM を用いてそれぞれ評価した。

## 結果

膜成長初期の粒子サイズや密度を調べるため、膜厚 1.0 nm の FePt 薄膜を基板温度 600 °C で堆積した。Fig.1 (a)及び(b)に、格子ミスマッチが 1.3%と 8.3%である STO 及び MgO 基板の FePt 膜の平面 TEM 像を示す。これらの像から STO/FePt では D が 6.3 nm であるのに対し MgO では D 4.7 nm と、格子ミスマッチの増大に伴い D が縮小することが分かった。Fig.1 (c)にミスマッチに対する D 及び GD をプロットしている。D はミスマッチの増大に伴い減少し、16%ではその変化が飽和しつつある。それに伴い GD もミスマッチの増大とともに増大し、徐々に飽和していくことが分かった。これらの結果より、格子ミスマッチ制御が粒子サイズや粒子密度の改善に大きく寄与することが分かった。当日は FePt-C についての結果と合わせて議論する。

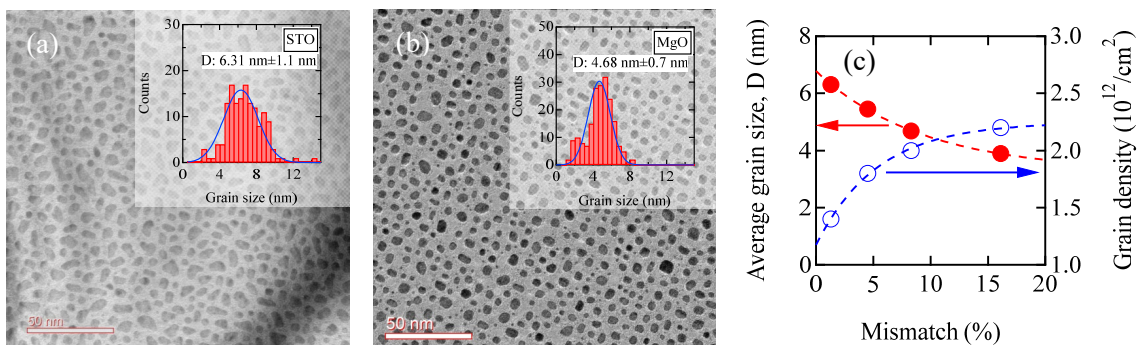


Fig.1 Plan-view TEM images of 1.0-nm-thick FePt grown on (a) STO and (b) MgO.

(c) Average grain size and grain density as a function of lattice mismatch.

## 参考文献

- 1) D. Weller *et al.*, IEEE. Trans. Magn. **50**, 3100108 (2014).
- 2) I. Suzuki *et al.*, J. Magn. Magn. Mater. **500**, 166418 (2020).
- 3) Y. Chen *et al.*, Phys. Rev. Lett. **77**, 4046 (1996).

## 強磁性粒界材を含有するキャップ層による フルグラニューラ積層型垂直磁気記録媒体の反転磁界分布および表面粗さの低減

◦タム キム コング<sup>a)</sup>, 櫛引 了輔<sup>a)</sup>, 鎌田 知成<sup>a)</sup>, 斉藤 伸<sup>b)</sup>

(<sup>a)</sup>田中貴金属工業株式会社, (<sup>b)</sup>東北大学)

### Reduction of switching field distribution and surface roughness for full granular stacked perpendicular recording media by utilizing cap layer consisting of ferromagnetic grain boundary

◦Kim Kong Tham<sup>a)</sup>, Ryosuke Kushibiki<sup>a)</sup>, Tomonari Kamada<sup>a)</sup>, and Shin Saito<sup>b)</sup>

(<sup>a)</sup>TANAKA KIKINZOKU KOGYO K.K., (<sup>b)</sup>Tohoku University)

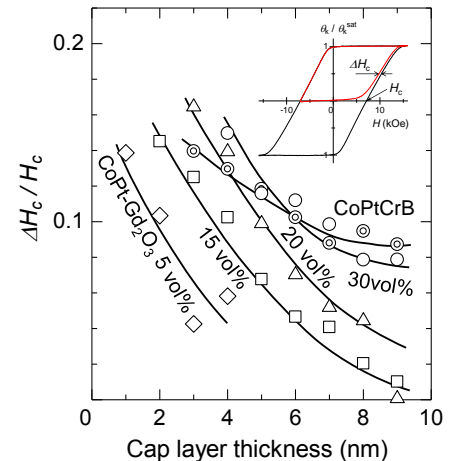
**はじめに** 現在市販されている垂直磁気記録媒体はグラニューラ層 (GRL) とキャップ層 (CL) の積層構造からなっている。GRL は CoPt 合金結晶粒と非磁性粒界酸化化物で構成されている。GRL の粒界材としては、 $B_2O_3$  が高結晶磁気異方性エネルギー ( $K_u$ ) を持つコラム状成長磁性結晶粒との二相析出を促進する効果的な材料であることが報告された<sup>1)</sup>。CL は積層媒体の粒間交換結合<sup>2)</sup> と反転磁界分布<sup>3)</sup> を制御するために用いられている。CL 材料の一つとして、強い粒界交換結合を有する CoPtCrB の連続膜が提案されている<sup>4)</sup>。この材料の課題は GRL の金属-酸化物の相分離構造上に積層した場合に金属結晶粒上に CL 金属が核発生しやすいため CL の厚み方向に構造が不均一になることである。このことにより精密な粒間交換結合の制御が困難となり、媒体の反転磁界分布が増大してしまう<sup>5)</sup>。この問題を解決するために、我々は高  $K_u$  CoPt 結晶粒と強磁性粒界酸化物からなるグラニューラ型 CL を用いた積層型媒体を提案した<sup>6)</sup>。本講演では CL の粒間交換結合を変化させるため、CL の強磁性酸化物の含有量を変化させた検討を行い、その反転磁界分布と微細構造を調べたので報告する。

**実験結果** 媒体は室温で作製し、層構成を Sub/ Ta (5 nm)/ Ni<sub>90</sub>W<sub>10</sub> (6 nm)/ Ru (0.6 Pa, 10 nm)/ Ru (8 Pa, 10 nm)/ Ru<sub>50</sub>Co<sub>25</sub>Cr<sub>25</sub>-30vol%TiO<sub>2</sub> (1 nm)/ Co<sub>80</sub>Pt<sub>20</sub>-30vol%B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (16 nm)/ Co<sub>80</sub>Pt<sub>20</sub>-(5~30) vol%Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0~9 nm)/ C (7 nm) とした。

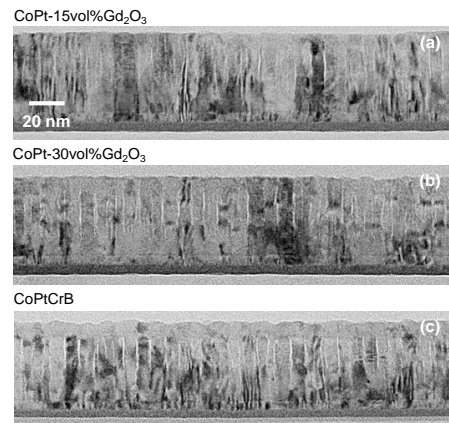
Fig. 1 には、様々な Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含有量の CoPt-Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> グラニューラ CL を用いた積層媒体の反転磁界分布の CL 厚さへの依存性を示している。比較のため、CoPtCrB 連続 CL を用いた媒体の反転磁界分布もプロットされている。ここで、反転磁界分布は  $\Delta H_c$  と  $H_c$  の比率から評価される<sup>7)</sup>。 $\Delta H_c$  は挿入図に示すように、規格化された  $M_s$  の半分でのマイナーとメジャーヒステリシスループとの差として定義される。CoPt-Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> CL を用いた積層媒体の場合、CL の厚さが増加すると、 $\Delta H_c/H_c$  は減少する傾向を示す。CL の厚さ 4 nm に注目すると、Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の含有量が 30 から 5vol% に減少すると、 $\Delta H_c/H_c$  は 0.15 から 0.06 に大幅に減少する。これは、CL の Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の含有量を減らすことで反転磁界分布が減少することを示している。さらに、積層媒体の  $\Delta H_c/H_c$  を CoPt-Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> グラニューラ CL と CoPtCrB 連続 CL で比較すると、Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> が 30vol% 未満に減少すると、より小さな  $\Delta H_c/H_c$  が得られ、CoPt-Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> グラニューラ CL は CoPtCrB 連続 CL を用いた媒体よりも反転磁界分布が小さくなっていることを示している。

Fig. 2 には、(a) CoPt-15vol%Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, (b) CoPt-30vol%Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> および (c) CoPtCrB CL を用いた媒体の断面 TEM 写真を示している。CoPt-Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> CL を用いた媒体に注目すると、Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の含有量を 30 から 15vol% に低減しても、媒体の表面は CoPtCrB CL を用いた媒体に比べて平坦である。EDX 元素分析によると、磁性結晶粒の均一な構造と GRL から CL までの粒界を観察することができる。これらの結果は、CoPt-Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> CL を用いることで、現在の CL に比べて表面が平坦で反転磁界分布が狭い媒体を実現できることを示している。

**参考文献** 1) K. K. Tham et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, **55**, 07MC06 (2016). 2) Y. Sonobe et al., *J. Appl. Phys.*, **91**, 8055 (2002). 3) Y. Sonobe et al., *J. Magn. Magn. Mater.*, **303**, 292 (2006). 4) G. A. Bertero et al., *IEEE Trans. Magn.*, **38**, 1627 (2002). 5) K. K. Tham et al., *J. Appl. Phys.*, **112**, 093917 (2012). 6) K. K. Tham et al., *IEEE Trans. Magn.*, **55**, 3200305 (2019). 7) I. Tagawa et al., *IEEE Trans. Magn.*, **27**, 4975 (1991).



**Fig. 1** Dependence of switching field distribution for stacked media with CoPt-Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> granular CL of various content of Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on CL thickness (solid lines). For a comparison, switching field distribution of the medium with CoPtCrB continuous CL is also plotted (dotted line).



**Fig. 2** Cross section TEM images of media with (a) CoPt-15vol%Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, (b) CoPt-30vol%Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and (c) CoPtCrB CLs.